

滇池藻类动态变化规律及其与氮磷质量浓度的关系研究

侯秀丽¹, 周 苾², 何志波¹, 陈智斌¹, 严艳飞¹, 张家桥¹, 苏 源¹, 刘兴祝¹, 吴晓妮¹, 王定康^{1*}

(1. 昆明学院生命科学与技术系 云南省高校特色生物资源开发与利用重点实验室, 云南 昆明 650214;

2. 昆明市第二职业中等专业学校, 云南 昆明 650228)

摘要:在 2013 年 9 月~2014 年 8 月期间, 每月监测滇池藻类及营养盐 N 和 P 的质量浓度, 结果表明: 外海 N 全年稳定, 其值在 1.70~2.40 mg/L; 草海 N 质量浓度呈双波峰变化, 草海 N 远高于外海. 草海和外海 P 质量浓度在 2013 年 10 月~2014 年 2 月均逐渐降低; 草海和外海 P 在 2014 年 4~7 月持续增高, 草海 P 远高于外海. 外海蓝藻和绿藻呈互为消长, N 质量浓度全年稳定, P 质量浓度持续升高, 而 N/P 下降 (TN:TP < 10), 蓝藻和绿藻迅速增加, 但绿藻仍占有优势, 说明高 P 的水体中绿藻比蓝藻具有更强的利用优势. 草海 N 和 P 变化剧烈且高于外海, N/P 比率 > 25 时, 蓝藻生物量极低, 绿藻、硅藻占优, 说明高 N 和 P 质量浓度及 N/P 比率 > 25 的草海中蓝藻不占优势, 绿藻和硅藻占优.

关键词:滇池; 蓝藻; 绿藻; 氮; 磷

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A 文章编号: 1674-5639(2016)06-0076-05

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2016.06.017

Dynamic Changing Rule and the Relationship with Nitrogen and Phosphor Concentration of Planktonic Algae in Dianchi Lake

HOU Xiuli¹, ZHOU Yi², HE Zhibo¹, CHEN Zhibin¹, YAN Yanfei¹, ZHANG Jiaqiao¹,
SU Yuan¹, LIU Xingzhu¹, WU Xiaoni¹, WANG Dingkang^{1*}

(1. Department of Life Sciences and Biotechnology, Key laboratory of Special Biological Resource Development and Utilization
of Universities in Yunnan Province, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214;

2. Second Vocational Secondary Schools of Kunming, Kunming, Yunnan, China 650228)

Abstract: The monitoring of algae and the concentration of nutrition N and P in Dianchi Lake has been made every month from September, 2013—Autumn, 2014. The results show that the nitrogen content in Waihai of Dianchi lake was steady in every month with the range value of 1.70—2.40 mg/L, that of Caohai of Dianchi lake was double-peak pattern and nitrogen of Caohai was higher than that of Waihai. Phosphorous concentration in Caohai and Waihai gradually declined from October, 2013 to February, 2014, but rose from April to July, 2014, and phosphorous concentration in Caohai was far higher than that of Waihai. In Waihai, there was a trade-off relationship between *cyanobacteria* and *cholorophyta* and the nitrogen concentration was steady in all months; phosphor concentration was gradually rising, but the N/P ratio gradually declined (TN:TP < 10). The *cyanobacteria* and *cholorophyta* glowed rapidly, yet the *cholorophyta* was dominant, showing that *cholorophyta* owns stronger advantage for using than *cyanobacteria* in high phosphor content lake. In Caohai, the change of nitrogen and phosphor concentration were more acutely higher than that of Waihai. When the N/P ratio was higher than 25, the biomass of *cyanobacteria* genus was very low and *cholorophyta* and *diatom* were dominant, showing that in Caohai with high N and P concentration and the N/P ratio higher than 25, *cyanobacteria* had no advantage but *cholorophyta* and *diatom* were more dominant algae.

Key words: Dianchi Lake; *cyanobacteria*; *cholorophyta*; nitrogen; phosphor

滇池是我国西南云贵高原第一大淡水湖泊, 由于其无大江大河良好水源注入, 自净能力十分有限. 加之

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300349); 云南省科技厅应用基础研究计划资助项目(2011FZ175); 昆明学院人才引进资助项目; 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目.

作者简介: 侯秀丽(1977—), 女, 河北保定人, 副教授, 博士, 主要从事恢复生态学研究.

* 通讯作者: 王定康(1965—), 男, 云南曲靖人, 教授, 博士, 主要从事生态遗传学研究, E-mail: wdk117@163.com.

社会经济发展,以营养盐为主的污染物超量流入水体致使富营养化严重.由于营养盐是水域生态系统的物质基础,水体中藻类的爆发与营养盐(特别是N和P含量)的组成和含量密切相关^[1-2].一些研究^[3-4]表明,过量磷的输入是造成水体富营养化问题的主要因素之一,所以支持磷削减是控制自然水体水华发生的关键.而一些学者^[5-7]针对长江中下游湖泊蓝藻分布调查显示,蓝藻群落分布主要受总磷、硝氮、氨氮的影响,水华的爆发不仅受磷限制同时受到明显的氮限制.刘莲等^[8]在实验室内对两种蓝藻和两种绿藻在控制N和P含量的对比试验中发现,蓝藻适合低氮磷比和绿藻适合高氮磷比,与Schindler^[9]和Smith^[10]等提出的TN/TP学说相一致,即湖泊表水层中 $TN/TP \leq 29$ (质量比)时,蓝藻占优; $TN/TP < 25$ (原子比)时,蓝藻占优;而 $TN/TP > 25$ 时,绿藻和硅藻占优.由此可见,众多研究针对氮磷含量及氮磷比率导致水体水华爆发的主导因素存在争议,究其原因主要是这些研究主要集中在水体藻类分布调查和在实验条件下来模拟藻类生长变化等两方面,而在自然水体中藻类演替不仅与水体营养盐动态变化相关,而且取决于浮游植物群落内物种之间的生态关系.基于此,监测水体中藻类变化及水体中N和P的波动,对澄清藻类及营养盐时空异质性及藻类演替机制至关重要.

云南高原湖泊滇池2001~2009年蓝藻门水华束丝藻与蓝藻门微囊藻在水体中随季节的演替,成为水华爆发的两大优势种群^[11-12],这说明滇池中不同类群的藻类生长的最适温度、最适营养盐含量和营养盐利用方式存在差异,而滇池中藻类演替是否随水体中营养盐的含量及氮磷比率的变化而变化?滇池中藻类演替过程中,在特定营养盐含量及氮磷比率中哪种藻类具有较强的利用优势?滇池北部、南部水域藻类变化是否存在差异?为了更加深入地了解藻类演替机制及藻类的生态关系,本研究对滇池水体营养盐及藻类的变化,进行长达1a的动态监测,以期分析在自然水体中蓝藻绿藻在什么情况下占优势,以及藻类连续演替过程与氮磷比率的关系.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池湖体分南北两个区,中间有一航道相通.北部水区称草海,南部水区是滇池的主体部分称外海.草海、外海水体现今已完全由船闸大堤分隔,湖面面

积分别为10.8,298.2 km²^[13].本研究包括野外采集水样和实验室分析两部分.滇池水样采集地点如图1所示:在滇池草海选取2个采样点,外海8个采样点,共10个采样地点.2013年9月~2014年8月每月1日晴朗天气时(如果为阴天,择日取样),在水体表面以下20 cm处用玻璃瓶采集水样,并立即带回实验室进行分析.应用德国WALZ公司生产的浮游植物可分类荧光仪(Phyto-PAM)对当天采集的水样分别分析蓝藻、绿藻、硅藻的生物量.该仪器通过监测各种藻类的叶绿素含量(质量浓度,下同)来确定10个水样中蓝藻、绿藻、硅藻的生物量.并采用美国哈希水质分析仪(DR5000)分析监测水体中N和P的含量(质量浓度,下同).试剂均采用哈希公司配备的试剂包.



图1 滇池采取水样地点分布

1.2 数据处理方法

滇池草海2个采样点和外海8个采样点所测定的藻类含量及N和P含量数据取其平均值分别表征草海、外海水体营养元素含量及藻类组成.应用Original8.0软件进行绘图.

2 结果与分析

滇池藻类、N和P月动态变化如下图2所示.滇池外海N质量浓度在全年都趋于稳定,其值范围在

1.70~2.40 mg/L, 12 月份其质量浓度出现最高值为 2.40 mg/L. 滇池草海 N 质量浓度, 在 2013 年 9 月~2014 年 2 月逐渐增多, 到 2 月份到达最高值 11.00 mg/L. 随后 N 质量浓度持续下降, 到 4 月和 5 月 N 质量浓度最低, 其值分别为 4.50, 4.55 mg/L. 6 月开始 N 质量浓度逐渐增高, 8 月份质量浓度最高, 其值为 11.70 mg/L. 草海中 N 质量浓度呈双波峰变化, 最高值分别出现在 2 月和 8 月. 滇池草海水体中最低月份 N 质量浓度是外海最高月份 N 质量浓度的近 2 倍, 草海全年 N 质量浓度远远高于外海.

滇池草海和外海 P 质量浓度都呈现在 2013 年 10 月~2014 年 2 月逐渐降低, 2 月份为全年的最低值, 值分别为 0.06, 0.08 mg/L. 2014 年 4 月~2014 年 7 月 P 质量浓度持续增高, 7 月份出现全年的最高值, 分别为 3.10, 1.08 mg/L. 到 8 月份 P 质量浓度下降, 其值分别为 2.19, 0.28 mg/L. 草海水体 P 质量浓度最高值是外海水体的近 3 倍, 而最低值相近. 从月动态数据得出, 滇池草海 P 质量浓度总体高于外海.

滇池外海 N/P 从 2013 年 9 月~2014 年 2 月持续增高, 到 2 月份 N/P 最高, 其值为 23.58. 2014 年 4 月~2014 年 7 月外海的 N/P 迅速降低, 7 月其值最低为 7.18, 到 8 月份略有上升. 外海全年 N 的变化趋于稳定, N/P 的变化依赖于水体中 P 元素质量浓度的变化, 即 P 质量浓度越低, 则 N/P 越高, 而 P 波动及 N/P 的变化是影响该水体藻类生物量变化的关键因素. 滇池草海 N/P 全年随 N 和 P 质量浓度的波动而变化, 2013 年 10 月~2014 年 2 月也是持续增高, 值都高于 10, 到 2 月份 N/P 最高, 其值达到 183.33. 2013 年 10 月~2014 年 2 月期间 P 质量浓度趋于稳定, N 持续增高, 造成此期间 N/P 持续增高. 在 2014 年 3 月~2014 年 7 月 P 和 N 质量浓度持续增高, 但 P 质量浓度增幅高于 N, 导致此期间的 N/P 较低, 其值小于 5.

滇池外海藻类动态变化(见图 2-e 所示)在 2013 年 9 月~2014 年 1 月, 蓝藻生物量持续增高, 到 1 月份最高; 2014 年 2 月~5 月蓝藻生物量呈现全年中较低的质量浓度, 其中 3 月份最低; 2014 年 3 月~7 月蓝藻生物量又持续增高. 滇池外海绿藻的月动态变化与蓝藻呈互为消长, 2013 年 9 月~2014 年 1 月绿藻生物量呈现先升高后降低的趋势, 而在 2014 年 2 月~5 月逐渐升高, 2014 年 8 月为全年最

低. 滇池外海硅藻生物量几乎为零, 在 2014 年 3 月份有微量分布. 滇池草海硅藻在各月份均有分布, 蓝藻生物量比外海低, 大多月份主要以硅藻和绿藻为主. 2013 年 9 月~2014 年 2 月硅藻生物量逐渐降低, 1 月份硅藻生物量最低. 2013 年 3 月~8 月硅藻开始缓慢升高, 后降低, 到 2014 年 5 月~7 月草海无硅藻分布. 在滇池草海绿藻与硅藻呈互为消长的趋势, 2014 年 5 月~2014 年 7 月绿藻占优.

3 讨论

在自然水体中, N 和 P 是浮游植物生长所需的重要营养盐^[14], 结合本研究对 N 和 P 监测结果显示, 滇池外海和草海营养盐的年际变化趋势存在很大不同. 滇池外海 N 质量浓度在 1 a 中的变化较小, 趋于稳定. P 质量浓度则在 4 月~9 月质量浓度升高, 其他月份 P 质量浓度低且稳定, 呈现水体中 P 营养充足, 导致氮成为限制因子影响滇池外海藻类的变化. 通过调查滇池 9 a 的藻类变化数据显示, 蓝藻门中水华束丝藻、微囊藻随季节演替, 成为滇池蓝藻水华两大优势种群^[11-12]. 本研究中滇池外海(2013 年 12~2014 年 2 月)冬季水体中低 P 和 N 稳定, 而相应的 N/P(TN:TP>17)则呈现全年中最高, 属于磷限制, 而水体中蓝藻占优势, 这可能是水体中水华束丝藻对低温有较强的适应能力, 生长较好. Schindler 等基于实验湖沼学研究提出了富营养化治理控磷是关键^[3,4,15], 但单一控磷措施在很多湖泊中很可能失败, 因为水体中磷在底泥和水质之间循环较快^[16], 即使在 P 限制的水体中, 冬季滇池外海中蓝藻仍能大量生长. 而在 2014 年 3 月~7 月之间滇池外海水体中 P 质量浓度持续升高, N 稳定, N/P(TN:TP<10)逐渐下降, 属于 N 限制, 而蓝藻和绿藻生长都迅速增加, 但相应的水体中绿藻仍占有优势, 这说明在 N 稳定的情况下, 高 P 的水体环境中绿藻比蓝藻有更强的利用优势, 致使绿藻生物量高于蓝藻. 尽管在低氮环境下蓝藻中具有明显固氮能力的藻种, 诱导异形胞的分化, 异形胞利用 N_2 合成 NH_3 , NH_3 在酶的作用下被转运到蓝藻营养细胞中供细胞生长和分化需要^[17-18], 致使蓝藻在氮限制情况下能迅速生长, 而绿藻在氮限制及高 N/P 的水体环境中呈现更强的利用优势. 许海等^[19]研究发现, 在氮限制培养下蓝藻门铜绿微囊藻生长效率低于绿藻斜生栅藻. 万蕾等^[20]研究了

蓝藻门中微囊藻和绿藻门中四尾栅藻在贫营养、富营养和超富营养水体中的生长竞争情况,发现铜绿微囊藻和四尾栅藻分别适合生长在中等偏低及中等偏高的营养水平. 秦伯强等^[21]指出,蓝藻水

华可能是当水体中营养盐达到一定程度,但又不十分充分的情况下,其他藻类生长受到限制,蓝藻由于某些生理上的优势,成为该阶段的优势种,而超富营养湖泊蓝藻生长不占优势.

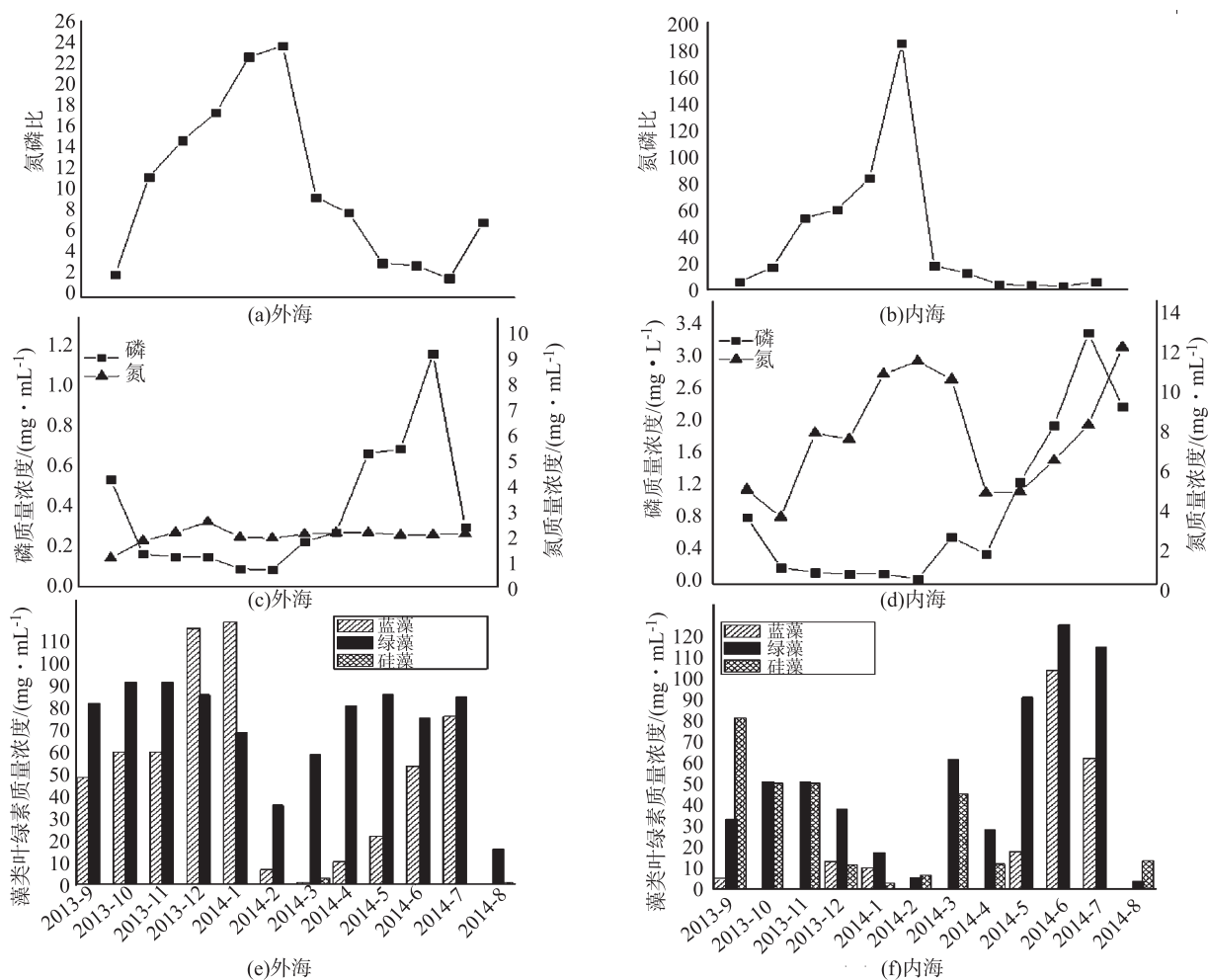


图2 滇池水体中营养盐及藻类动态变化

滇池草海与外海水体 N 和 P 营养元素质量浓度差别很大. 草海中全年水体中 P 质量浓度范围在 0.06 ~ 3.10 mg/L, 外海则在 0.07 ~ 1.08 mg/L, 最低值都是出现在 10 月份, 最高值都出现在 7 月份, 两者都呈现 10 月份至次年的 2 月份较低, 其他月份 P 质量浓度持续增高. 外海水体中 N 质量浓度常年稳定, 其值范围在 1.05 ~ 2.40 mg/L, 草海则全年变化剧烈, 其值范围在 3.3 ~ 11.0 mg/L, 这说明草海水体中富营养化程度高于外海, 这是由于昆明主城区位于滇池流域草海北岸, 草海污染负荷约占流域污染负荷总量的 80%^[22]. 有研究^[23]表明, 草海水体中富营养类污染物对其水质贡献最大, 由于草海的地理位置及接纳污染源而言, 势必造成草海水质富营养

化程度高于外海. 滇池草海 N 和 P 在 6 ~ 8 月份都是逐渐增高, 外海水体中 P 也呈增高趋势, 这是由于在夏季降水比较充沛, 流域中农业面源污染随降水的地表输移作用被带入水体^[24]. 在 10 月份至次年的 2 月份期间, 滇池草海 P 质量浓度稳定 (0.06 ~ 0.20 mg/L), N 质量浓度持续增高, N/P 比率也增高 (值大于 25), 属于 P 限制, 水体中蓝藻生物量极低, 绿藻、硅藻占优, 本研究结果与当 N/P 比率大于 25 时水体中绿藻和硅藻占优的 N/P 学说相一致^[3,10]. 草海从 3 月份 ~ 8 月份, P 和 N 质量浓度持续增高, 但 N/P 比率很低 (其值范围 3.1 ~ 17.0), 水体属于 N 限制, 硅藻消失, 蓝藻、绿藻生长逐渐迅速, 总体仍然是绿藻占优势, 本研究结果与刘莲等^[8]对水华微

囊藻与四尾栅藻单独培养的实验中发现蓝藻门中水华微囊藻适合低氮磷比生长,而绿藻门中四尾栅藻适合在高氮磷比生长的研究结果略有不同。本研究结果支持草海水体 P 和 N 为高质量浓度时,绿藻则占优势,这说明富营养化程度较高的草海水体中蓝藻不占优势,此研究结果与吴世凯等^[6]研究的结果蓝藻出现在污染较重的湖泊类型中的结果相反,支持超富营养化湖泊蓝藻不占优势的观点^[25-27]。

4 结论

1) 全年通过对滇池草海外海中 N 和 P 营养元素质量浓度的分析,发现滇池草海 N 和 P 元素的变化较外海变化剧烈,其富营养化程度也高于外海。

2) 在滇池草海、外海水体中绿藻、蓝藻、硅藻变化趋势随 N 和 P 及 N/P 比率而波动。外海水体中 N 稳定, P 增加,绿藻较蓝藻有较强的利用优势;草海中 N 和 P 都升高的月份,绿藻也占优,某种程度上说明在超富营养湖泊中蓝藻生长不占优势。

【参考文献】

- [1] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [2] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [3] SCHINDLER D W, HECKY R E, FINDLAY D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [4] WANG H J, WANG H Z. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 1445-1451.
- [5] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2230-2236.
- [6] 吴世凯, 谢平, 倪乐意, 等. 长江中下游地区湖泊中蓝藻及其与氮磷浓度的关系[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(3): 19-25.
- [7] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系[J]. 环境科学学报, 2012(4): 821-827.
- [8] 刘莲, 周小玉, 赵良杰, 等. 氮磷比率对两种蓝藻和两种绿藻生长的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(4): 573-581.
- [9] SCHINDLER D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. Science, 1977, 195(4275): 260-262.
- [10] SMITH V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. Science, 1983, 221(4611): 669-671.
- [11] LIU Y M, CHEN W, LI D H, et al. First report of aphanotoxins in China-water blooms of toxigenic *Aphanizomenon flos-aquae* in Lake Dianchi[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 65(1): 84-92.
- [12] 张梅, 李原, 王若南. 滇池浮游植物的生物多样性调查研究[J]. 云南大学学报, 2005, 27(2): 172-176.
- [13] 李根保, 李林, 潘珉, 等. 滇池生态系统退化成因、格局特征与分区恢复策略[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 485-496.
- [14] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. Limnology Oceanography, 1988, 33: 796-822.
- [15] CARPENTER S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication[J]. PNAS, 2008, 105(32): 11039-11040.
- [16] 吴艳龙, 郑凌凌, 李林, 等. 滇池水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)对低氮的生理响应[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 131-136.
- [17] MURO-PASTOR M I, REYES J C, FLORENCIO F J. Ammonium assimilation in cyanobacteria [J]. Photosynthesis Research, 2005, 83: 35-150.
- [18] ADAMS D G. Heterocyst formation in cyanobacteria[J]. Current Opinion in Microbiology, 2000, 3(6): 618-624.
- [19] 许海, 吴雅丽, 杨桂军, 等. 铜绿微囊藻、斜生栅藻对氮磷饥饿的耐受能力研究[J]. 生态科学, 2014, 33(5): 879-884.
- [20] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1231-1235.
- [21] 秦伯强. 长江中下游水体湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [22] 李跃勋, 徐晓梅, 何佳, 等. 滇池流域点源污染控制与存在问题解析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 633-639.
- [23] 周圆, 杨树平, 黄俊, 等. 滇池草海水水质变化趋势和特征污染物分析[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(2): 20-25.
- [24] 包立, 张乃明, 农明英. 滇池东大河流域土壤磷素累积规律及空间分布特征研究[J]. 土壤, 2014, 46(3): 470-474.
- [25] CANFIELD D E, PHILIPS E, DUARTE C M. Factors influencing the abundance of blue-green algae in Florida lakes [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1989, 46: 1232-1237.
- [26] CARMEN R J. Differential attributes of phytoplankton across the trophic gradient: a conceptual landscape with gaps[J]. Hydrobiologia, 1998, 369: 1-9.
- [27] 王小冬, 秦伯强, 高光, 等. 无机氮磷添加对太湖来源浮游植物和附着生物生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2257-2261.